

## La rehabilitación en obras de madera laminada

Enrique Nuere. Dr. Arquitecto

Las estructuras de madera históricas han pasado por un largo proceso evolutivo que ha ido afinando los modelos empleados hasta llegar a soluciones que hoy son perfectamente vigentes. Sin embargo, las exigencias impuestas por las normativas existentes, (aunque en España no existen aun de forma oficial), pueden no ser cumplidas estrictamente por estructuras que encontramos al rehabilitar o restaurar edificios.

Existen dos opciones en este tipo de actuaciones: o bien analizar la resistencia real de la madera utilizada, que puede ser mayor de la que la norma oficial le asigna, o bien reforzar los elementos que incumplen la normativa hasta alcanzar los valores exigidos.

Pero aun existe otra alternativa, que consiste en obviar el análisis de la resistencia de los elementos dañados, siempre que tengamos la evidencia, avalada en ocasiones por el paso de siglos de vida del conjunto en que se integran dichos elementos, contrastado por el buen estado de otros elementos similares de la misma estructura que no hayan sufrido daños. Si este fuera el caso bastaría devolver a los elementos afectados su sección original, con nueva madera, para devolverles su capacidad de supervivencia.

Este camino obliga a realizar prótesis con técnicas de encolado similares a las utilizadas para fabricar madera laminada, lo que nos ofrece una interesante alternativa en el campo de la restauración y rehabilitación.

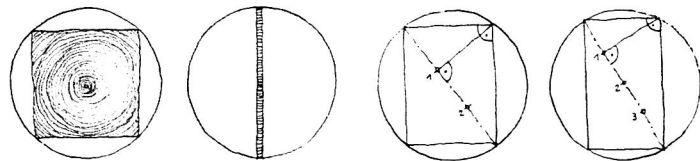
Hoy en día no es preciso explicar las ventajas que la madera laminada ofrece a la arquitectura actual. Sobre todo en su aplicación a las grandes estructuras por su gran virtud respecto de otros materiales: su ligereza.

Pues bien, también su ligereza puede ser decisiva a la hora de utilizarse en obras de rehabilitación o restauración.

La madera ha planteado históricamente una serie de problemas derivados de su condición natural, pero también los lógicos a causa de su única posibilidad de obtención a partir de troncos cilíndricos, (en realidad, ligeramente troncocónicos). Esto que puede parecer obvio, tiene sin embargo más trascendencia de lo que se puede pensar a simple vista, dado que ha condicionado de forma decisiva el modo de organizar las posibles estructuras de madera que se han realizado, o que aun estén por realizar con madera no laminada.

Si analizamos las escuadrías que es posible obtener de un tronco, vemos que se puede pasar de la sección cuadrada, a una delgada tabla cuya anchura será muy próxima al diámetro del tronco. El carpintero antiguo debía establecer alguna relación concreta para decidir qué sección le convenía más para lograr el máximo rendimiento del tronco apeado. (figura 1)

Hoy sabemos que dividiendo el diámetro de un cilindro en tres partes, y trazando una perpendicular desde una de estas divisiones hasta el perímetro, y desde este punto a los extremos de aquel diámetro, se obtiene la sección que proporciona el máximo momento resistente, y si el diámetro lo dividimos en cuatro partes, y hacemos la misma operación desde la primera o desde la última división, obtenemos la sección rectangular de máxima inercia que puede obtenerse



1. Teniendo en cuenta que las vigas se escuadraban con hacha, perdiendo en astillas el resto, una de las secciones más utilizadas era la cuadrada que conseguía el mínimo desperdicio del tronco de partida. Para conseguir tablas de gran anchura era preciso proceder con sierra, pero esta práctica era menos usual en la consecución de elementos resistentes..

2. Dividiendo el diámetro de la sección del tronco en tres partes, y trazando una perpendicular al mismo por uno de los puntos obtenidos se obtiene la sección de máxima resistencia, por ser la que proporciona el máximo módulo resistente,  $(bh^2/6)$ . Si el diámetro se divide en cuatro partes podemos obtener la sección de máxima inercia, es decir la que menor flecha tendrá,  $(bh^3/12)$ .

de determinado tronco, (figura 2). Pero es lógico suponer que antiguamente no podía existir esta certeza a la que hoy se llega por aplicación del simple análisis matemático, y que a la decisión para escoger una determinada sección sólo se podía llegar a través de la experiencia, eliminando las escuadrías que peores resultados ofrecían.

Lo que si podemos afirmar es que en la edad media ya se conocía cuál era la sección de máxima resistencia obtenible de un tronco, no sólo por poder constatar en obras de restauración que se trataba de las secciones más utilizadas, sino también por tener un testimonio en el manuscrito de Diego López de Arenas en el que se establece la forma de determinar el alto de un par de una armadura en función de su anchura. El procedimiento consistía en trazar por la base de un madero una línea con la cola del cartabón cuadrado, (o lo



que es lo mismo, un trazo a 45 grados), cuya dimensión entre ambos bordes del lado del madero en que se trazaba, era la altura que había de darse al canto de dicho madero.

Esta regla es equivalente a la de dividir el diámetro del tronco del que se va a obtener la pieza en tres partes, con lo que se obtiene con ella la sección de máxima resistencia. Además la proporción obtenida tenía otra virtud: que dividida en dos partes por la mitad del canto se obtienen dos nuevas secciones que cumplen las mismas condiciones. No sabemos que procedimiento se usaba en la práctica para determinar la sección idónea, pero supongo que estaría condicionado por el sistema de medir utilizado, basado en la vara, unidad que desgraciadamente variaba de unas regiones a otras.

Las secciones utilizadas tradicionalmente tenían un sistema de medidas tan sencillo como eficaz. La vara, que constaba de tres pies se dividía básicamente en dos, tres, cuatro, o seis partes, y para escuadrar una madera se tomaba, por ejemplo: para el canto un tercio, es decir un pie, y para su base un cuarto, o lo que era igual, un palmo. De esta forma la escuadría tenía  $1/4$  por  $1/3$  de vara. La proporción no coincide exactamente con la regla anterior, pero se aproxima mucho:  $1/4 = 0,25$  que multiplicado por raíz de dos resulta  $0,353553$ , en vez de  $0,333333$  que habría sido el valor exacto. Esta sección rectangular podía dividirse en dos, en cuyo caso se obtenía la de un cuarto por un sexto, que guarda una proporción parecida y por tanto sigue conservando buenas condiciones resistentes, o se dividía en cuatro partes: cuarterones, que sí respetaban la misma proporción original.

También era utilizada la sección cuadrada, aunque su rendimiento era claramente inferior.

De toda esta digresión sólo pretendo llamar la atención sobre el hecho de que las estructuras tradicionales obtenían prácticamente el máximo aprovechamiento resistente de la madera, y esto no sólo en cuanto a la decisión sobre la forma de escuadrarla, sino también respecto a la separación escogida entre las vigas de un forjado, que tradicionalmente se acercaba al doble del ancho de la base de las vigas utilizadas, y que es precisamente la que permite el aprovechamiento óptimo de la madera.

En definitiva, la conclusión a que llego después de estos análisis, es la de que las estructuras tradicionales no son fácilmente mejorables, y por tanto lo mejor que podemos hacer con ellas es mantenerlas como están. Otra cuestión será la que surge al plantear cambios de uso de edificios existentes, que requieren resistencias mayores de las que originalmente eran capaces de soportar, o la necesidad de cumplir las exigencias de las distintas normativas sobre las características resistentes de la madera.

Concretamente este último aspecto es el que en definitiva motivó mi interés por encontrar un método de intervención en rehabilitación que permitiera obviar la necesidad de realizar refuerzos de estructuras que el sentido común decía que eran innecesarios, pero que la aplicación estricta de las normas vigentes consideraba obligatorio.

La cuestión planteada era la siguiente: en el caso de rehabilitar un determinado edificio, con frecuencia podíamos observar que en general su estructura de madera se encontraba en buen estado, y el propio edificio no presentaba síntomas de asentamientos, grietas, etc, que pudieran hacer pensar que necesitase alguna reparación, salvo alguna intervención localizada en alguna parte del mismo, generalmente allí donde se concentraban los servicios sanitarios, con daños en elementos de madera que era imprescindible reparar.

Lógicamente la intervención más simple consistía en la sustitución de los elementos dañados por otros similares, pero nuevos, lo que exigía una sencilla verificación de sus capacidades resistentes. La sorpresa surgía cuando comprobábamos que aquellos elementos en mal estado no cumplían las exigencias de las normas, lo que obligaba a sustituirlos por otros de mayores secciones.

Naturalmente surgía la duda sobre el origen de la ruina de aquellos elementos concretos: ¿se trataba de lo que parecía evidente: es decir, la acción de humedades persistentes, lo que había causado su deterioro?, ¿o se trataba de que su sección, escasa según las normas, había influido de forma decisiva en dicho proceso degenerativo?

Una vez detectada la falta de la necesaria resistencia en algún elemento de la estructura, era preciso realizar una verificación del resto de elementos para quedarse totalmente tranquilo, a pesar de la evidencia de su buen estado, y de la óptima respuesta resistente que había ofrecido al paso de décadas o incluso de siglos. Y el resultado podía ofrecernos la sorpresa de que las secciones eran insuficientes para resistir las cargas que había estado soportando, sin problemas, años y años desde su construcción.

¿Estaba mal la estructura, o está mal la norma?. Realmente no debemos plantearnos la cuestión en estos términos. Las normas son correctas, dado que la madera es un material de características muy variables, cuyos valores resistentes pueden oscilar enormemente de una pieza a otra, aunque estén obtenidas de troncos de la misma especie, o incluso del mismo entorno, por lo que el legislador que establece las normas debe ser muy prudente a la hora de limitar los valores resistentes que puedan ofrecer garantías ciertas de que se cumplen por cualquier pieza de madera obtenida del bosque, (de donde nunca obtendremos un certificado de las características de la pieza, como podemos conseguirlo de la planta productora de hormigón armado, o de la acería que lamina los perfiles de acero que usamos en la construcción).

Ahora bien, sin necesidad de realizar una comprobación de las características estructurales de los componentes de un determinado entramado de madera, podemos diagnosticar su estado por el análisis de los síntomas visibles en el edificio sustentado por dicha estructura. Si no existen fisuras o grietas en sus muros, si no se han producido asentamientos diferenciales, y si sus forjados carecen de flechas que sobrepasen lo que las normas recomiendan, es evidente que la estructura que lo sustenta está en buen estado, y si no cambiamos las



condiciones de uso y el mantenimiento es eficaz, ese buen estado debe perdurar al menos tanto tiempo como lleva en pie el edificio.

Estas conclusiones me llevaron a tratar de establecer un método de intervención consistente en evitar por principio la comprobación de la capacidad resistente de las secciones que encontraba dañadas, pero verificando el correcto comportamiento estructural de soluciones idénticas, realizadas con piezas similares en la misma estructura, para determinar con exactitud si los fallos a reparar se debían exclusivamente a la pérdida de la sección de la pieza afectada, o era otra la razón del daño sufrido.

Si la conclusión obtenida me permitía establecer con seguridad que la estabilidad del sistema estructural tan sólo estaba afectada por la pérdida de sección de determinada pieza, bastaría devolver a dicha pieza su sección original para recuperar el estado inicial de equilibrio. De este modo era innecesario realizar ningún tipo de comprobación normativa, dado que la estructura en su estado original tenía garantizada su idoneidad por el mero hecho de haber soportado sin problemas el paso de años y años, (incluso de siglos), y que tan sólo el daño producido en alguno de sus elementos podía comprometer la estabilidad de la estructura.

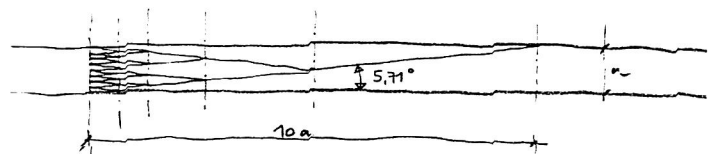
Para poder actuar de acuerdo a este criterio era preciso encontrar una forma eficaz de devolver a una pieza su sección original, normalmente perdida por ataques de xilófagos de cualquier tipo. Las características de la madera permiten lograr esto con gran facilidad. Es conocida la baja resistencia a la tracción perpendicular a las fibras de cualquier madera, así como su pequeña resistencia al cizallamiento en el sentido de las fibras. En otras palabras, la facilidad con que se hiende la madera, (figura 3). Quiere esto decir que si encolamos por sus caras dos piezas de madera, es muy probable que un esfuerzo de los mencionados anteriormente no separen la unión encolada sino que se rompa el conjunto por otro plano perteneciente a cualquiera de las dos piezas unidas. Esta característica es la que ha hecho posible la fabricación de madera laminada, sin tener que reducir la resistencia de la madera de la que se compone el conjunto, por el hecho de haber introducido una serie de uniones de cola, aunque lógicamente dichas uniones deberán realizarse en las debidas condiciones para que la unión encolada sea de absoluta garantía.

Pues bien, si el encolado de varias maderas puede mejorar su comportamiento resistente, ¿Por que no utilizar el mismo principio para reparar elementos de madera dañados?

La primera cuestión a resolver, antes de desarrollar un posible método, era la de tener algún dato de partida suficientemente contrastado para evaluar la resistencia de las uniones realizadas por este procedimiento. Este dato lo proporciona la norma DIN vigente en Alemania, que establece por un lado, un valor de 9 Kg/cm<sup>2</sup> como tensión admisible de trabajo de cizalladura en el sentido de las fibras, y por otra parte, el hecho de que sea admisible para una madera de la mejor cali-



3. La hendibilidad de la madera es una característica que puede considerarse como un defecto o como una virtud, según el punto de vista desde el que se analice. Si consultamos al carpintero que la trabaja, agradecer la facilidad de trabajo que proporciona esta característica, pero el ingeniero lamentar la poca resistencia que ofrece a la tracción ejercida en dirección perpendicular a sus fibras. No obstante este "defecto" permite fabricar madera laminada con absoluta garantía ya que un plano encolado no supone merma de resistencia en esta sollicitación.



4. La unión denominada "finger joint", basa su eficacia en el hecho de que la unión de dos maderas con un ángulo que guarde la relación 1/10 de la figura, es tan resistente como una madera continua. Si reducimos la distancia del empalme, pero aumentamos con el mismo ángulo los planos de encolado, teóricamente podremos llegar a realizar la unión en una longitud realmente mínima, siempre que podamos garantizar la perfecta coincidencia de los cortes de ambas piezas.

dad posible una desviación de sus fibras, respecto al eje de la pieza, que no rebase la relación 1/10 entre el espesor de la pieza y la longitud en la que sus fibras están desviadas.

Esto último quiere decir que dos maderas de la misma sección, en las que se cortaran sus extremos con un ángulo que guardara dicha relación y se encolaran juntas, podrían considerarse como una única pieza, cuyas características le permitirían encuadrarse en la mejor categoría resistente, dado que como ya anticipé, la resistencia de la encoladura realizada en adecuadas condiciones, es mayor que la de las propias fibras de madera. De ahí que ésta sea la recomendación para hacer uniones de este tipo que aparece en la misma norma DIN alemana, y en la que se basa la unión conocida como "finger joint", que se utiliza para unir las piezas que componen cada lámina de una pieza de madera laminada. (figura 4)

Sin embargo, y como se puede constatar de los trabajos realizados por Mikel Landa en su tesis doctoral, esto no es absolutamente cierto, dado que no siempre responde de igual manera dicha unión, dependiendo el resultado de que el plano de encolado sea o no vertical. Pero no me extendiendo en esta particularidad que supongo estará perfectamente detallada en el artículo que dicho autor incluye en esta misma publicación.

Naturalmente, en las primeras uniones realizadas por este procedimiento se siguió escrupulosamente el criterio de mantener la relación 1/10 para realizar el corte de unión de maderas, si bien en algunos casos en los que las piezas de madera estaban trabajando a valores de resistencia realmen-



te bajos, la longitud de empalme se podía rebajar en consonancia con la menor resistencia precisa. Más tarde, y gracias a los ensayos sistemáticos realizados por Mikel Landa, sabemos que para resistir esfuerzos de flexión, relaciones  $1/7$  y  $1/8$  permiten obtener resultados muy similares, (incluso mejores), siempre que el plano de encolado sea perpendicular al plano formado por las fibras neutras de la pieza.

Como es lógico, las primeras intervenciones que practiqué antes de conocer los resultados obtenidos por Mikel Landa en laboratorio, las diseñé sin confiar exclusivamente en la resistencia de la unión encolada según dicho ángulo, y en muchas ocasiones aproveché también la existencia de una serie de planos paralelos entre diversas maderas, susceptibles de encolarse, si bien en algunos casos, por tratarse de piezas de mayor espesor de las utilizadas en la fabricación de madera laminada, (y contar en cierto grado con la posibilidad de deslaminación, debida a las tensiones de contracción o hinchazón de sus componentes), se hacían en piezas que además contaban con herrajes capaces de mantener dichas piezas unidas. (figura 5)

El trabajo en obras de rehabilitación tiene la peculiaridad de requerir en cada caso respuestas muy diversas, y que se pueden o no llevar a cabo en función de las posibilidades de intervenir. Estas posibilidades dependen con frecuencia de las condiciones de la obra, que pueden ser totalmente inadecuadas para realizar este tipo de uniones, o de la disponibilidad de maquinaria o herramientas apropiadas para preparar la madera sobre la que se va a actuar.

En primer lugar debo advertir que aunque este tipo de uniones se podrían realizar con cualquier tipo de cola, las condiciones de una obra hacen descartar cualquiera que no sea absolutamente resistente a la humedad. Las más adecuadas son las resinas, como las de tipo epoxi, o las de resorcina, y siempre que sea posible, estas últimas son las más recomendables.

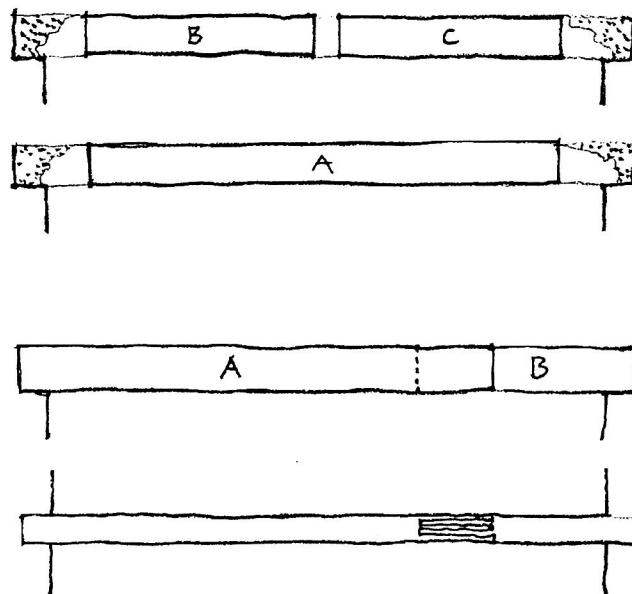
Como en el caso de la fabricación de la madera laminada, este tipo de uniones sólo se debe practicar por personas experimentadas en el uso de estas colas, respetando las necesarias exigencias de homogeneidad entre los grados de humedad de las maderas empleadas, - por supuesto siempre de la misma especie -, así como las condiciones ambientales necesarias para el correcto fraguado de la cola. También es imprescindible una cuidadosa preparación de las caras de madera a encolar, así como la aplicación de la presión correcta entre las piezas durante el tiempo de fraguado de la cola.

Todas las condiciones que son decisivas para conseguir buenas uniones, no siempre se encuentran disponibles en una obra, por lo que era necesario investigar estos aspectos para poder realizar este tipo de uniones con absoluta fiabilidad, trabajo emprendido por Mikel Landa y cuyos resultados son de enorme interés para quienes estamos inmersos en este tipo de intervenciones.

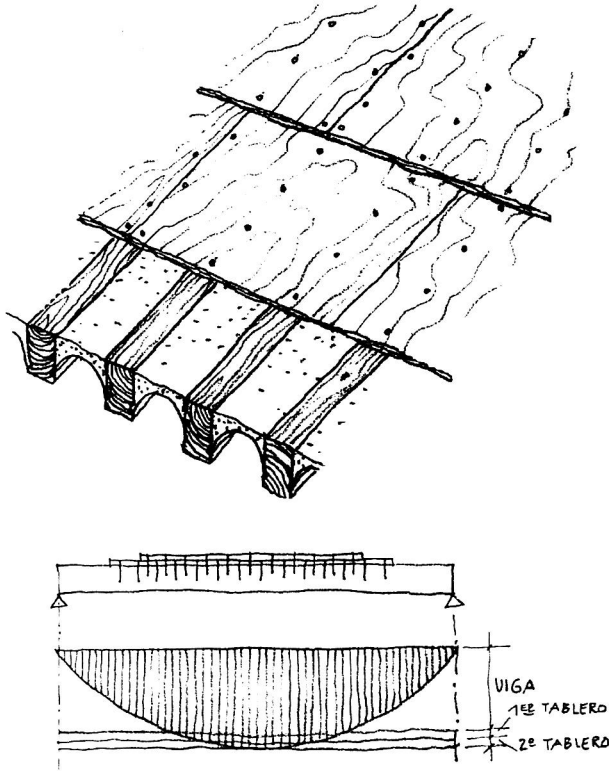
Pero a falta de los datos obtenidos sistemáticamente en laboratorio, hasta tener datos fiables que nos permitieran



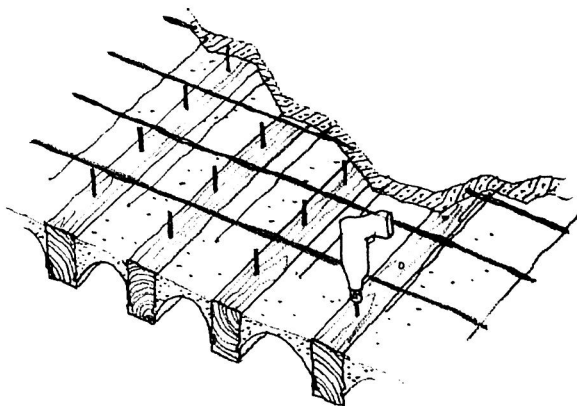
5. En cortes realizados en planos verticales, y en elementos que pueden trabajar independientes, (aunque se encuentren encolados), las uniones en bisel dan buenos resultados, sobre todo cuanto cuentan con la ayuda adicional de una gran superficie de encolado. Este tipo de uniones son de gran eficacia para conseguir continuidad en vigas de múltiples vanos. La unión debe realizarse para mayor garantía en la zona de momentos mínimos, donde siempre se cuenta con elementos continuos que pueden ser capaces de absorberlos.



6. En el palacio de Miguel de Mañara, de Sevilla se aprovecharon muchas vigas de forjados que presentaban serias pudriciones en sus dos extremos. Simplemente se eliminaron las partes dañadas y de otras vigas similares se obtenían dos elementos que completaban la longitud necesaria, haciendo el empalme por medio de una escopleadura múltiple. Las vigas así empalmadas se probaron en laboratorio, llegando incluso a provocar la rotura de alguna, comprobando con sorpresa que su resistencia superaba los valores asignables a madera nueva sin defectos.



7. En forjados de madera de vigas que no sean de grandes secciones se pueden conseguir eficaces refuerzos mediante tableros contrachapados que añaden al forjado una capa de compresión de gran ligereza. Normalmente no será necesario cubrir toda la superficie del forjado, ni realizar todo el refuerzo con el mismo espesor. Basta analizar el diagrama de momentos para determinar la forma de realizar los refuerzos. Es importante tener en cuenta que el refuerzo actúa creando una sección "T" en cada viga, por lo que la unión de tableros debe hacerse exclusivamente sobre el eje de las vigas, o en el eje de los vanos.



8. Para vigas de grandes secciones harían falta tableros de gran espesor, (o múltiples capas de tableros), y puede ser conveniente recurrir a una losa de hormigón que actúe como cabeza de compresión de las vigas de madera, que se encargarán de absorber las tracciones. Para que el trabajo sea conjunto se debe garantizar la unión con conectores de acero, (tornillos o varillas) que absorban los esfuerzos rasantes que se producirán en los dos materiales, lo que exige la realización de taladros previos en las vigas. La losa de hormigón deberá tener un armado transversal de reparto para evitar fisuraciones posibles por diferente resistencia de las vigas de madera.

una cierta confianza en el sistema, fue preciso llevar a cabo pruebas de carga de las uniones realizadas, a fin de tener mínimas garantías sobre el comportamiento futuro de las piezas reparadas. Las experiencias realizadas demostraban que trabajábamos siempre muy del lado de la seguridad, y realmente esto nos animaba a seguir practicando este tipo de reparaciones que siempre me han ofrecido más confianza que las realizadas con adición de elementos metálicos, sistema al que había que recurrir antes de llevar a cabo este tipo de práctica. (figura 6)

Afortunadamente el trabajo de Mikel Landa nos proporciona en estos momentos una base fiable sobre la que fundamentar este tipo de prótesis en la madera, por que lo recomiendo este tipo de práctica con preferencia a otro tipo de sistemas de refuerzo de estructuras, sin que ello quiera decir que no existan circunstancias en las que por ejemplo sea más aconsejable el empleo de morteros de resina de tipo epoxi con los correspondientes armados de placas o varillas de acero, o de fibra de vidrio. En definitiva deben ser las condiciones de puesta en obra de cada caso concreto, las que decidan la forma más adecuada de restaurar elementos de madera dañados, pero no debemos olvidar una de las cuestiones preliminares planteadas: el hecho de devolver la sección original a una pieza determinada, equivale a restituir la capacidad portante del conjunto en que se integra, y por tanto, este método tiene la enorme ventaja de poder obviar la comprobación del hipotético cumplimiento de normas, lo que puede ahorrarnos muchos quebraderos de cabeza, y lo que es más importante, un sinnúmero de intervenciones inútiles.

Quiero mencionar otro tipo de intervención que puede requerir que hagamos una comprobación puntual del cumplimiento de la normativa vigente en determinados elementos de una estructura. Por ejemplo, basta que decidamos cambiar el uso de un determinado edificio, y se alteren mínimamente las condiciones de trabajo de su estructura, para que no podamos eludir la comprobación de todos y cada uno de los elementos afectados por dicha decisión. Entonces veremos con demasiada frecuencia que elementos que aparentemente no tienen ningún problema de resistencia no cumplen con las prescripciones exigibles.

En este caso caben dos caminos de actuación: en primer lugar recalcular toda la estructura con el nuevo estado de cargas y dimensionar sus elementos de acuerdo a la normativa en vigor, lo que nos obligará a realizar determinados refuerzos; o bien comprobar uno por uno los elementos que incumplen la normativa oficial, y verificar su resistencia real, (y no la que según normativa debemos asignar a dicho elemento), que puede ser suficiente, lo que también ocurre con cierta frecuencia. Para emprender este último camino disponemos de dos opciones: o bien la medición por ultrasonidos del módulo de elasticidad de cada elemento, o la medición de la deformación que produce una determinada carga, (o en caso de que sea factible, la realización de una prueba de carga para obtener esos resultados).



En el caso de tener que reforzar elementos, también podemos recurrir a aumentar la sección con láminas adicionales de madera, que en el caso de forjados pueden sustituirse con ventaja por tableros de madera contrachapada o de fibras orientadas, (OSB), o aun mejor con contrachapados del tipo fabricado en Finlandia por Kerto, o del Microlam americano, cuyas hojas están dispuestas todas en la misma dirección, con lo que no se pierde la colaboración de las que en el contrachapado normal están dispuestas con sus fibras perpendiculares a las de las caras externas. (figura. 7). La técnica anterior tiene la ventaja, en el caso de edificios de varias plantas que precisen refuerzo sistemático, de que no aumenta la sobrecarga que finalmente llega a los pilares de la estructura, respecto de la misma solución en la que la cabeza de compresión que se añade a las vigas se realiza con hormigón, si bien es ésta una alternativa que en muchos ca-

sos no se debe despreciar. Puede surgir la tentación de realizar estas cabezas de compresión con hormigones de arlita aligerados, pero en ese caso la eficacia de la solución se reduce, por el peligro de rotura de la arcilla en contacto con conectores. (figura 8)

En definitiva, este tipo de prótesis realizadas encolando maderas a los elementos a reforzar, nos permite ampliar la gama de posibilidades de intervención en obras de restauración y rehabilitación, sin que por ello considere que se trata de la única solución recomendable. En cada caso serán las circunstancias particulares de cada intervención las únicas que determinen la decisión sobre la forma de actuar, pero deberemos tener en cuenta que siempre que se puedan cumplir con facilidad las exigencias del encolado de maderas en la obra, las prótesis así realizadas ofrecen una serie importante de ventajas respecto de otras alternativas posibles.